

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.S1.060

# 风干板栗太阳能-热泵联合干燥特性与数学模型研究

刘英娜<sup>1</sup> 边翼博<sup>1</sup> 郭雪霞<sup>2</sup> 刘瑜<sup>2</sup> 王海<sup>2</sup>

(1. 河北农业大学食品科技学院, 保定 071000; 2. 农业农村部规划设计研究院, 北京 100125)

**摘要:** 为研究风干板栗太阳能-热泵联合干燥特性,以新鲜板栗为原料,探讨干燥温度、干燥风速、装载量对风干板栗干燥速率和干基含水率的影响,在不同干燥温度、干燥风速、装载量条件下分别对新鲜板栗进行干燥,并比较了6种数学模型在风干板栗太阳能-热泵联合干燥的适用性,同时以 Fick 第二扩散定律为依据,确定风干板栗不同干燥条件下的有效水分扩散系数。结果表明:风干板栗干燥过程由调整阶段和降速干燥阶段控制,主要表现为降速干燥;干燥温度越高、干燥风速越高以及装载量越小,干燥至目标含水率所用时间越短,干燥速率越大;干燥过程中,有效水分扩散系数随干燥温度及干燥风速的升高、装载量的降低呈现增大的趋势,干燥温度从 15℃ 升高到 35℃,其有效水分扩散系数由  $3.00124 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  增大到  $8.42115 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ ,干燥风速由 1.0 m/s 升高到 5.0 m/s,其有效水分扩散系数由  $4.54717 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  增大到  $9.13767 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ ;装载量从 0.6 kg 升高至 5.4 kg,其有效水分扩散系数由  $1.14753 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$  降至  $3.20443 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ ;通过比较决定系数( $R^2$ )、残差平方和及卡方( $\chi^2$ )得出,Page 模型为描述风干板栗太阳能-热泵联合干燥的最优模型,验证发现试验值与模型预测值拟合度较高, Pearson 相关系数为 0.998,二者显著相关( $P < 0.05$ ),说明 Page 模型能够较好地反映风干板栗干燥过程中水分变化规律。

**关键词:** 风干板栗; 太阳能-热泵联合干燥; 干燥特性; 数学模型

**中图分类号:** S214.4      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1298(2020)S1-0509-08

## Drying Characteristics and Mathematical Model of Air-dried Chestnut by Combined Solar Energy and Heat Pump

LIU Yingna<sup>1</sup> BIAN Yibo<sup>1</sup> GUO Xuexia<sup>2</sup> LIU Yu<sup>2</sup> WANG Hai<sup>2</sup>

(1. College of Food Science and Technology, Hebei Agricultural University, Baoding 071000, China

2. Academy of Agricultural Planning and Engineering, Beijing 100125, China)

**Abstract:** In order to explore the drying characteristics of air-dried chestnut by combined solar energy and heat pump during the drying process, using fresh chestnut and under the conditions of different drying temperatures, airflow rates, loading capacities, the experiment on combined drying of solar energy and heat pump was carried out for air-dried chestnut to study the effects of different drying factors on drying rate and moisture content of dry basis. At the same time, six mathematical models were used to fit the relationship between moisture ratio and drying time in the drying process of air-dried chestnut, and the optimal model was determined. Besides, based on Fick's second diffusion law, the effective moisture diffusion coefficient of air-dried chestnut under different drying conditions was determined. The results showed that the drying process of air-dried chestnut was controlled by adjusting stage and falling speed drying stage, and the main drying process was falling drying stage. The drying rate of air-dried chestnut was increased with the increase of temperature, the increase of airflow rate and the decrease of the loading capacity. During the drying process, the experimentally observed effective moisture diffusion coefficient values were increased from  $3.00124 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  to  $1.14753 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$  with the increase of drying temperature and airflow rate, and the decrease of loading capacity. By fitting six mathematical models, the results of comparing the values of the correlation coefficient  $R^2$ , sum of squares of residuals and the

收稿日期: 2020-08-10 修回日期: 2020-08-30

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0700200)

作者简介: 刘英娜(1995—),女,硕士生,主要从事农产品加工与贮藏研究,E-mail: 2796926322@qq.com

通信作者: 王海(1964—),男,研究员,博士生导师,主要从事农产品加工与贮藏研究,E-mail: wanghai948@126.com

chi-square ( $\chi^2$ ) showed that the Page model was the optimal model for describing air-dried chestnut by combined solar energy and heat pump, as well as the predicted value fitted well with experimental value obtained. The results would provide a technical basis for the application which was a combination of solar energy and heat pump in air-dried chestnut drying.

**Key words:** air-dried chestnut; drying by combined solar energy and heat pump; drying characteristics; mathematical model

## 0 引言

板栗是一种营养价值高、味道鲜美、风味独特的坚果类食品<sup>[1-4]</sup>。目前板栗在欧洲、亚洲和美洲广泛种植,其中中国是全球最大的板栗生产国,年产量可达全球板栗产量的80%以上,2018年种植面积34.39万公顷,产量约为198.32万吨。但是新鲜板栗采收期短,采后呼吸代谢旺盛,易腐败变质<sup>[5]</sup>,造成极大的资源 and 经济浪费。因此对板栗深加工的研究尤为重要。

干燥脱水是食品加工和保鲜中广泛应用的技术。物料经适当的脱水干燥可延长货架期,保持品质,减少营养流失和损耗,增加产品的附加值。传统的风干板栗干制主要采用自然晾晒的方式,效率低、干燥周期长,且干燥过程的温度和含水率不能合理调控,同时产品品质受温度、阴雨天气等外界因素,易出现爆壳、发霉及干燥不充分等现象,因此寻求风干板栗新的脱水干燥技术,合理控制干燥过程中温度和含水率的变化,优化产品质量,提高干燥效率十分迫切。太阳能干燥作为节能减排的新型干燥方式,是以高效光热转化技术为依托<sup>[6-8]</sup>,通过控制温度和风速等参数达到理想的干燥效果和预期产品质量<sup>[9-10]</sup>,但其受昼夜、天气以及季节的影响,不适合连续利用<sup>[11]</sup>,太阳能与热泵的联合技术不但能充分利用太阳能资源,而且弥补了太阳能干燥的缺陷,减少天气条件限制,增加太阳能干燥的稳定性<sup>[12]</sup>。目前太阳能-热泵联合干制技术已用于无核白葡萄<sup>[13]</sup>、龙眼肉<sup>[14]</sup>、南瓜片<sup>[15]</sup>、洋甘菊<sup>[16]</sup>等的干燥,并取得了良好效果。

含水率是影响干燥品质的重要指标,然而测定干燥过程中含水率比较困难,为更好控制干燥过程,需要建立数学模型,借助模型对干燥过程分析。国内外已有大量关于坚果、水果等物料脱水干燥的研究,通过数学模型预测水分变化规律以更好控制干燥过程,有些已成功应用并取得显著成效。文献[17]在红瓜子热风干燥特性和动力学研究中发现温度对红瓜子干燥特性有重要的影响,随着温度升高,干燥时间缩短,干燥速率提高;且不同干燥温度下红瓜子热风干燥符合单项扩散模型;文献[18]在红心火龙果热风干燥动力学模

型及品质变化研究中发现 Page 模型符合红心火龙果的干燥;文献[19]在山核桃微波干燥动力学模型研究中发现山核桃坚果微波干燥过程中,与装载量相比,微波功率对山核桃坚果干燥速率影响大;山核桃坚果微波干燥的动力学模型符合 Page 模型。由于板栗结构复杂,目前对板栗干燥特性及数学模型的研究主要集中在板栗粉和板栗片<sup>[20-22]</sup>方面,然而对风干板栗干燥数学模型<sup>[23-24]</sup>及干燥特性的研究报道较少,因此研究新技术分析风干板栗干燥过程具有重要意义。

本文在前人研究基础上,结合河北省迁西县板栗资源优势,以新鲜板栗为研究对象,利用太阳能-热泵联合干燥技术,研究风干板栗太阳能-热泵联合干燥特性和失水规律,探讨干燥温度、风速及装载量对风干板栗干燥特性的影响,确定适合描述风干板栗干燥过程中含水率变化规律的数学模型,以期能为太阳能-热泵联合干燥技术在风干板栗的应用提供理论依据和技术支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

试验材料选用大标燕山早丰(313)板栗,购自河北迁西县星桥板栗合作社,选取大小均匀一致、高度1.5 cm、宽度在2.0~2.5 cm之间的鲜板栗,采摘后前期贮藏于-3~0℃的大型机械冷库,放置14 d左右运至河北农业大学0~2℃的冷库以备用于试验。

### 1.2 仪器与设备

HLS-18型太阳能-热泵干燥设备,出自张家口泰华机械厂,其结构图如图1所示。整个设备包括太阳能集热系统、热泵、干燥室和智能控制系统4部分。单个太阳能集热器的结构尺寸(长×宽×高)为2010 mm×995 mm×150 mm。本设备由9块平板式太阳能集热器组成,采用三串联三并联的混联结构。热泵被用作辅助加热器,当太阳能集热系统的温度低于设定的温度时,热泵将用于补偿热量,达到设定的温度。干燥室内通过放置托盘(尺寸(长×宽)为580 mm×380 mm)对物料进行干燥。智能控制系统用于实现干燥过程的数据化和自动化,本试验中用于温度和风速的设置。

工作原理: 太阳能集热系统通过吸收太阳辐射能温度升高, 空气在风机的牵引下进入集热器被加热, 通过风道从下方进入装有托盘的干燥室, 热空气通过装有被干燥物料的托盘, 由顶部流出, 并以恒定的速度流过湿物料, 完成热交换。此设备可以对温度和风速进行精度调节。

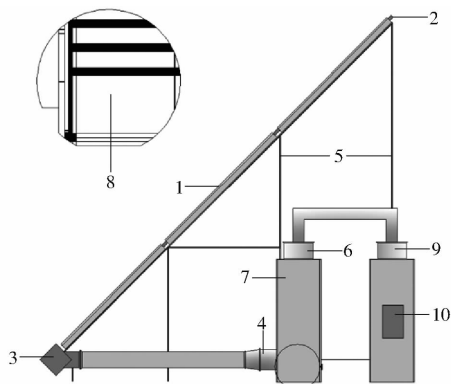


图 1 太阳能-热泵设备示意图

Fig. 1 Schematic of solar energy and heat pump dryer

1. 太阳能集热器 2. 进气口 3. 空气输送隧道 4. 对流风机
5. 支架 6. 循环风机 7. 干燥室 8. 托盘架 9. 热泵 10. 智能控制中心

其他仪器与设备: OH6-914385-Ⅲ型电热恒温鼓风干燥箱(广州新苗医疗仪器制造公司); CP214 型分析天平(奥豪斯仪器(上海)有限公司); DS100-8 型电子秤(凯丰集团有限公司)。

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 样品预处理

预处理: 每次干燥试验之前, 将冷库中的新鲜板栗倒入水池中进行浮选分级, 剔除漂浮在水面的板栗(可能已经腐烂或被虫侵蚀), 干燥试验使用沉入水中的板栗, 将用于试验的板栗沥水、放置阴凉处 12 h 以备开展试验。

#### 1.3.2 太阳能-热泵联合干燥风干板栗试验设计

##### (1) 干燥温度

探讨不同干燥温度对风干板栗干燥特性的影响, 设置 5 个处理, 分别为干燥温度 15、20、25、30、35℃(误差 ± 1℃), 其中每个处理的装载量恒定为 3.0 kg ± 6 g, 干燥风速恒定为 (2.0 ± 0.1) m/s。将经预处理的板栗, 平铺到干燥箱 3 个托盘, 每个托盘均匀放置 1.0 kg ± 2 g 板栗, 将托盘置于干燥室中间部位。干燥过程中每隔一定时间(白天每隔 4 h, 夜间隔 12 h)测定样品质量变化直至湿基含水率降到 (0.38 ± 0.01) g/g(通过企业调研此时产品外观、适口性、品质等最佳)时停止试验。

##### (2) 干燥风速

探讨不同干燥风速对风干板栗干燥特性的影响, 设置 5 个处理, 分别为干燥风速 1.0、2.0、3.0、

4.0、5.0 m/s(误差 ± 0.1 m/s), 其中每个处理的装载量恒定为 3.0 kg ± 6 g, 干燥温度恒定为 (25 ± 1)℃。将经预处理的板栗, 平铺到干燥箱 3 个托盘里, 每个托盘里均匀放置 1.0 kg ± 2 g 板栗, 将托盘置于干燥室中间部位。取样方法及停止试验条件同上。

##### (3) 装载量

探讨不同装载量对风干板栗干燥特性的影响, 设置 5 个处理, 分别为装载量 0.6、1.8、3.0、4.2、5.4 kg(误差 ± 6 g), 其中每个处理的干燥温度恒定为 (25 ± 1)℃, 干燥风速恒定为 (2.0 ± 0.1) m/s。将经预处理的板栗, 平铺到干燥箱 3 个托盘, 每个托盘里均匀放置相同质量的板栗, 将托盘置于干燥室中间部位。取样方法及停止试验条件同上。

### 1.4 干燥参数的计算方法

#### 1.4.1 干基含水率

干燥过程中干基含水率参照 GB/T 2009.3—2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》中直接干燥法进行, 计算公式为

$$M_t = (B_t - B_d) / B_d \quad (1)$$

式中  $M_t$ —— $t$  时刻样品的干基含水率, g/g

$B_t$ —— $t$  时刻样品的质量, g

$B_d$ ——绝干物料质量, g

#### 1.4.2 干燥速率

干燥速率计算公式为

$$D_R = \frac{M_1 - M_2}{t_1 - t_2} \quad (2)$$

式中  $D_R$ ——干燥速率, g/(g·h)

$M_1$ ——样品干燥到  $t_1$  时刻的干基含水率, g/g

$M_2$ ——样品干燥到  $t_2$  时刻的干基含水率, g/g

#### 1.4.3 水分比

水分比计算公式为

$$M_R = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (3)$$

式中  $M_R$ ——水分比

$M_e$ ——干燥平衡时样品的干基含水率, g/g

$M_0$ ——样品的初始干基含水率, g/g

### 1.5 数学模型与评价参数

对流干燥数学模型已广泛有效地应用于不同农产品干燥过程的分析。为了建立对流干燥过程中的传质方程, 考虑了以下因素: 该过程等温; 主要的传质机理是扩散性质的; 干燥过程中样品的变形和收缩可以忽略不计<sup>[25]</sup>。蔬菜和水果的对流干燥主要发生在降速干燥期, 因此可以将半经验和经验模型应用于干燥数据。本试验使用的数学模型如表 1 所示<sup>[26]</sup>。

表1 用于模拟干燥风干板栗曲线的数学模型

Tab.1 Mathematical models used to simulate drying curve of air-dried chestnut

模型名称	表达式
Newton	$M_R = \exp(-kt)$
Two-term	$M_R = a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t)$
Logarithmic	$M_R = a \exp(-kt) + c$
Page	$M_R = \exp(-kt^n)$
Verma et al	$M_R = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-k_0 t)$
Henderson and Pabis	$M_R = a \exp(-kt)$

将试验得到的数据进行非线性回归拟合分析,用于评估拟合优度的参数是残差平方和、卡方( $\chi^2$ )及决定系数( $R^2$ )<sup>[27]</sup>,描述样品干燥特性最佳模型的评价准则为具有最高 $R^2$ 、最低 $\chi^2$ 和残差平方和。

### 1.6 模型的验证

为验证数学模型的准确性,根据风干板栗干燥特性得到不同干燥条件的适宜范围,选取最适范围的一组数据进行验证,此条件下试验重复3次,取平均值,将其与预测值进行比较。

### 1.7 有效水分扩散系数

有效水分扩散系数作为评价物料脱水能力的指标,对分析内部水分扩散及工艺优化有重要的意义。当干燥主要由降速阶段控制时,可以用 Fick 扩散方程来描述其干燥特性,方程的具体解法见文献[28]。假设样品具有相同的初始水分分布,那么有效扩散系数满足

$$M_R = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \exp\left(-\frac{n^2 \pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right) \quad (4)$$

式中  $D_{eff}$ ——有效水分扩散系数,  $m^2/s$

$L$ ——样品厚度的一半,  $m$

对于较长的干燥周期,上述方程可简化为级数的第一项,而不影响预测的精度,即

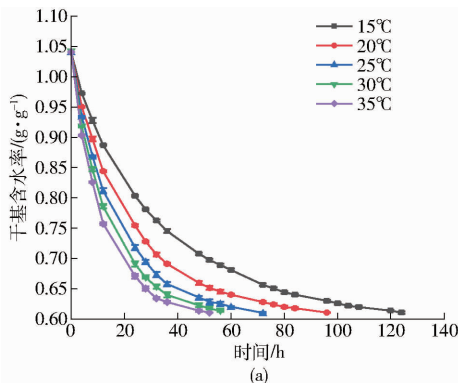


图2 干燥温度对干燥特性的影响

Fig.2 Effects of drying temperatures on drying characteristics

干燥温度对风干板栗干燥速率的影响如图2b所示。从图2b可见,温度可决定物料的干燥速率。在不

$$M_R = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right) \quad (5)$$

两边取对数变形为

$$\ln M_R = \ln \frac{8}{\pi^2} - \frac{\pi^2}{4L^2} D_{eff} t \quad (6)$$

式(6)为  $\ln M_R$  相对于  $t$  的曲线,将曲线进行线性拟合,则由直线的斜率可以计算得到有效水分扩散系数。设式(6)的斜率为  $k_0$ ,则有效水分扩散系数可以表示为

$$D_{eff} = -\frac{k_0 4L^2}{\pi^2} \quad (7)$$

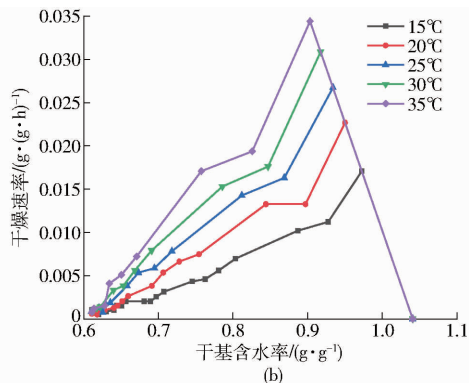
### 1.8 数据处理

采用软件 Origin 8.6 进行绘图和模型拟合,应用 SPSS 22.0 软件进行回归分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 干燥温度对风干板栗干燥特性的影响

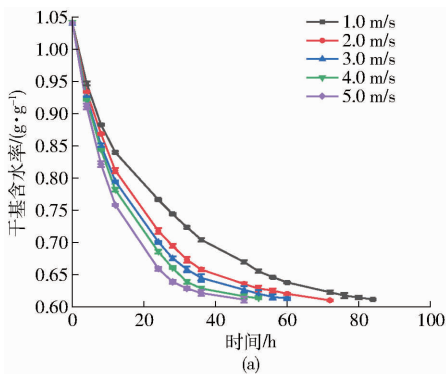
不同干燥温度下风干板栗的干燥曲线如图2a所示。由图2a可见,风干板栗的干基含水率随着时间的延长呈降低趋势,其中温度越低,曲线越平缓,耗时越长,含水率降低越慢。在一定的温度范围内(15~35°C),提高干燥温度可以加速干燥过程,大幅缩短干燥时间,这是因为升高温度,板栗壳表面和板栗仁水分获得的热量多,从而使水分内部扩散和水分蒸发加快,使得干燥时间缩短,但较高的温度(35°C),由于板栗仁中较多水分受到表面壳的冲击阻力不易蒸发,出现爆壳现象及发生不均匀的褐变现象,影响产品的外观及易受到外界微生物的污染,导致品质下降,但较低的温度(15°C),虽保证了产品的质量,但干燥时间较长,不利于节约成本。综合分析,太阳能-热泵联合干燥风干板栗的适宜温度为20~30°C。



同干燥温度下,温度越高,干燥速率越快,物料干燥过程中所能达到的最高干燥速率越大<sup>[29]</sup>。干燥过程由调

整阶段和降速干燥阶段控制。调整阶段自干燥初始至干燥速率达到峰值,随后保持长时间的降速干燥阶段,可能是由于干燥初期板栗自由水较多,热风使得表面水分快速气化的同时,板栗温度升高导致用于水分蒸发的热量增加,此时干燥速率增加,继续干燥含水率降低,干燥速率开始下降,进入降速阶段,可能是因为板栗壳是一种多孔物质,热风使得板栗壳、隔膜及仁空隙增大,此时大量水分通过壳仁空隙及壳空隙被蒸发出去,导致板栗干燥速率下降较快,随着干燥过程的继续,可能是因为板栗仁的内部水分蒸发在传送到壳表面的过程中传质传热的阻力增强,导致干燥速率下降缓慢。当干基含水率从  $0.65 \text{ g/g}$  到干制至最终目标,各风温下干燥速率差异不大,表明此范围内温度对干燥速率几乎无影响。

在提高效率以及满足防止爆壳、预防褐变等高



品品质要求前提下,太阳能-热泵联合干燥风干板栗的最适温度为  $25^\circ\text{C}$ 。

## 2.2 干燥风速对风干板栗干燥特性的影响

不同干燥风速下风干板栗的干燥曲线如图 3a 所示。由图 3a 可见,干燥风速对板栗达到目标含水率有一定的影响,干燥风速为  $1.0$ 、 $2.0$ 、 $3.0$ 、 $4.0$ 、 $5.0 \text{ m/s}$  时,板栗干燥至目标含水率所需时间分别为  $84$ 、 $72$ 、 $60$ 、 $52$ 、 $48 \text{ h}$ ,由此可见板栗达到干燥终点的时间随着干燥风速的升高而明显缩短。干燥风速升高,热风流动速度加快,使得水分蒸发速度加快,从而提高干燥效率,但干燥风速过高 ( $4.0 \sim 5.0 \text{ m/s}$ ),板栗表面水分蒸发过快,由于板栗仁中的水分急于蒸发,出现爆壳现象,影响产品的外观及易受到外界微生物的污染。综合试验结果分析,板栗干燥的适宜干燥风速为  $1.0 \sim 3.0 \text{ m/s}$ 。

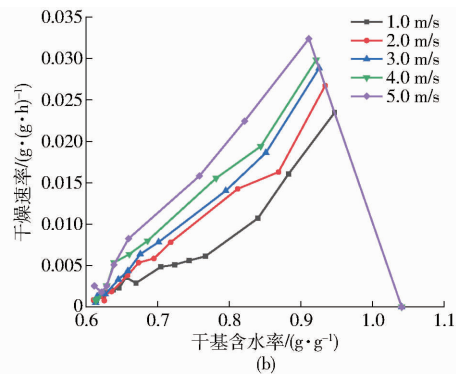


图 3 干燥风速对干燥特性的影响

Fig. 3 Effects of airflow rate on drying characteristics

干燥风速对风干板栗干燥速率的影响如图 3b 所示。从图 3b 可见,风干板栗太阳能-热泵联合干燥过程未观察到恒定速率阶段,只观察到调整阶段和降速阶段,这与澳洲坚果干燥特性类似<sup>[30]</sup>。干燥初始阶段,干基含水率较高,干燥风速提高,水分蒸发速度快,导致干燥速率比较大,干燥速率迅速达到最大值,之后保持较长时间的降速干燥,干燥过程主要表现为降速干燥阶段。当干基含水率一定时,干燥速率随干燥风速的增大而增大。当干燥风速为

$1.0 \text{ m/s}$  时,干燥速率相比于其他风速条件下的干燥速率下降趋势较平缓。

在提高效率以及满足防止爆壳、预防褐变等高品品质要求前提下,太阳能-热泵联合干燥风干板栗的最适干燥风速为  $2.0 \text{ m/s}$ 。

## 2.3 装载量对风干板栗干燥特性的影响

不同装载量下风干板栗的干燥曲线如图 4a 所示。由图 4a 可见,装载量对干燥板栗所需时间有明显的影 响,且装载量越低,干基含水率下降趋势越

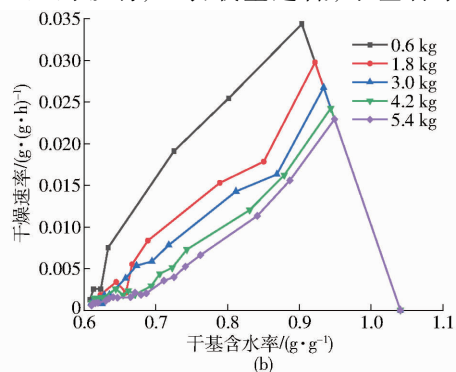
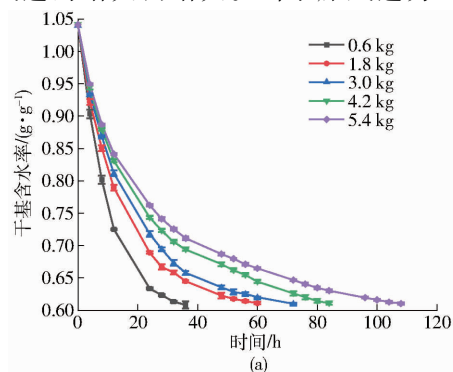


图 4 装载量对干燥特性的影响

Fig. 4 Effects of loading capacity on drying characteristics

大,达到干制目标所需时间越短。当装载量为 0.6 kg 时,所需时间为 36 h,而装载量为 5.4 kg 时,所需时间为 84 h,表明装载量越低,所需干燥时间越短,这可能是因为装载量较少,在一定的空间内空气流动速度较快,与干燥空气接触的相对表面积越大,干燥越迅速,达到目标含水率所需的时间越短,但较低的装载量(0.6 kg),易出现爆壳及能源不被充分利用的现象,造成能源的浪费;而在一定空间内较高的装载量(5.4 kg),由于单位面积板栗的密度过大,易出现受热不均匀、干燥时间延长的现象。综合经济效益和试验结果分析,板栗干燥适宜装载量为 1.8~4.2 kg。

装载量对风干板栗干燥速率的影响如图 4b 所示。从图 4b 可见,干燥速率曲线随装载量的不同而不同。当干基含水率相同时,装载量越低,干燥速率越快。随着装载量的增加,干燥时间延长,干燥速率降低,可能是因为物料装载量增多,风干板栗需要的水分蒸发量增多,但在一定的干燥温度和风速条件下,热量是一定的,单位时间内提供给单位质量物料的热量降低。

在提高效率以及满足防止爆壳、预防褐变等商品品质要求前提下,太阳能-热泵联合干燥风干板栗的最适装载量为 3.0 kg。

## 2.4 数学模型的建立

### 2.4.1 风干板栗数学模型拟合结果

使用试验数据非线性拟合 6 种数学模型的统计结果如表 2 所示。由表 2 可见,干燥曲线数据与各

数学模型方程拟合的  $R^2$  均在 0.99 以上,表明 6 个数学模型均可阐述风干板栗干燥过程中的水分变化规律,其中 Page 模型有着最高的  $R^2$ (0.998 61)、最低的  $\chi^2$ (0.000 17)和残差平方和(0.002 12),说明 Page 模型的拟合程度最高,因此最终确定 Page 模型为最适合描述风干板栗太阳能-热泵干燥过程水分变化的模型。

表 2 风干板栗干燥数学模型的统计结果

Tab. 2 Statistical result of drying mathematical models for air-dried chestnut

模型	$R^2$	$\chi^2$	残差平方和
Newton	0.996 27	0.000 39	0.005 79
Logarithmic	0.996 18	0.000 38	0.080 71
Page	0.998 61	0.000 17	0.002 12
Verma et al	0.996 70	0.000 34	0.004 54
Henderson and Pabis	0.997 02	0.000 30	0.004 04
Two-term	0.997 74	0.000 23	0.002 98

### 2.4.2 Page 模型的求解

风干板栗太阳能-热泵联合干燥 6 种模型参数统计结果如表 3 所示,根据表 3 中所显示在不同干燥过程中 Page 模型参数( $k$  和  $n$ ),以干燥温度、风速和装载量为变量,用回归方法对多个方程进行检验,根据  $R^2$ 、 $F$  值和 Sig. 值等标准对方程进行评价,最终得到参数值。提供最佳结果的表达式为

$$k = 0.002 + 0.003T + 0.002V \quad (R^2 = 0.90)$$

$$n = 1.002 + 0.037V - 0.064M + 0.002T \quad (R^2 = 0.94)$$

式中  $T$ ——干燥温度,℃

表 3 风干板栗太阳能-热泵联合干燥 6 种模型参数统计结果

Tab. 3 Parameters statistical results of six models for combined solar energy and heat pump of air-dried chestnut

模型	参数	条件												
		15℃, 3.0 kg, 2 m/s	20℃, 3.0 kg, 2 m/s	25℃, 3.0 kg, 2 m/s	30℃, 3.0 kg, 2 m/s	35℃, 3.0 kg, 2 m/s	25℃, 3.0 kg, 1 m/s	25℃, 3.0 kg, 3 m/s	25℃, 3.0 kg, 4 m/s	25℃, 3.0 kg, 5 m/s	25℃, 0.6 kg, 2 m/s	25℃, 1.8 kg, 2 m/s	25℃, 4.2 kg, 2 m/s	25℃, 5.4 kg, 2 m/s
Newton	$k$	0.032 56	0.047 34	0.061 18	0.074 66	0.088 35	0.045 66	0.071 21	0.079 14	0.091 33	0.105 81	0.073 16	0.048 63	0.041 56
	$a$	0.970 85	0.971 63	0.977 93	0.988 82	0.992 59	0.966 30	1.021 00	1.101 00	1.014 64	1.040 77	0.992 43	0.941 89	0.920 96
Logarithmic	$k$	0.030 79	0.046 49	0.060 83	0.072 34	0.086 50	0.040 75	0.068 21	0.070 61	0.102 40	0.098 04	0.070 94	0.048 90	0.041 62
	$c$	-0.006 50	0.003 23	0.004 79	-0.004 79	-0.003 25	-0.019 78	-0.016 90	-0.061 13	0.013 74	-0.034 24	-0.005 60	0.017 29	0.021 56
Two-term	$a$	0.712 80	0.157 58	0.500 60	0.492 99	0.497 91	0.477 29	-0.085 78	1.010 66	1.010 66	0.804 62	0.072 07	0.824 00	0.139 01
	$k_0$	0.027 71	0.105 20	0.049 09	0.063 22	0.102 91	0.038 79	0.070 24	0.079 21	0.092 40	0.107 53	0.059 40	0.056 66	1.000 00
	$b$	0.263 92	0.831 08	0.486 58	0.496 11	0.495 29	0.479 33	1.073 67	-0.013 41	-0.010 88	0.211 05	0.917 54	0.147 09	0.861 43
Page	$k_1$	0.049 15	0.041 70	0.076 41	0.086 92	0.075 35	0.049 22	0.070 25	0.195 98	1.272 03	0.107 64	0.073 49	0.019 79	0.035 26
	$k$	0.043 11	0.060 33	0.072 86	0.084 32	0.096 66	0.065 94	0.078 52	0.074 49	0.081 77	0.077 48	0.079 94	0.079 1	0.080 39
Verma et al	$n$	0.923 61	0.926 14	0.941 65	0.955 88	0.964 69	0.890 33	0.965 41	1.022 67	1.044 39	1.135 01	0.968 16	0.850 67	0.807 92
	$a$	0.073 40	0.926 05	1.539 62	0.953 34	0.958 32	0.982 10	0.122 36	1.008 59	-1.000 00	1.118 08	2.924 44	-0.603 03	0.750 21
Henderson and Pabis	$k$	0.016 12	0.050 69	0.061 17	0.077 07	0.090 71	0.046 53	0.051 62	0.079 69	0.091 21	0.117 95	0.073 18	0.048 64	0.056 75
	$k_0$	0.034 69	0.021 73	0.061 15	0.041 57	0.050 64	0.018 48	0.074 75	0.242 85	-1.010 27	0.562 75	0.073 19	0.048 64	0.019 26
Henderson and Pabis	$a$	0.096 73	0.973 38	0.980 69	0.985 97	0.990 58	0.954 59	0.987 90	1.000 77	1.005 39	1.015 73	0.989 22	0.950 57	0.930 36
	$k$	0.031 45	0.045 99	0.059 87	0.073 47	0.087 4	0.043 44	0.070 25	0.079 21	0.091 87	0.107 56	0.072 28	0.045 93	0.038 29

$V$ ——干燥风速, m/s

$M$ ——装载量, kg

由表达式可看出  $k$  值受干燥温度和干燥风速的影响, 而  $n$  值受风速、温度及装载量的影响, 并且与装载量成反比例关系, 根据参数表达式确定的 Page 模型方程式为:  $M_R = \exp(- (0.002 + 0.003T + 0.002V)t^{1.002 + 0.037V - 0.064M + 0.002T})$ 。

### 2.4.3 Page 模型的验证

为验证模型的准确性, 根据风干板栗干燥特性得到不同干燥条件的适宜范围, 选取最适的一组数据进行检验, 在试验条件为: 干燥温度 25℃, 干燥风速 2.0 m/s, 装载量 3.0 kg, 风干板栗干燥数学模型拟合验证结果如图 5 所示。由图 5 可见, 试验值与模型预测值的拟合度较高, Pearson 相关系数为 0.998, 二者显著相关 ( $P < 0.05$ ), 说明 Page 模型能够较好地反映风干板栗干燥过程中水分的变化规律。

### 2.5 风干板栗有效水分扩散系数

风干板栗在不同条件下的有效水分扩散系数如表 4 所示。由表 4 可知, 不同干燥温度、不同干燥风速及不同装载量对应的有效水分扩散系数不同, 其

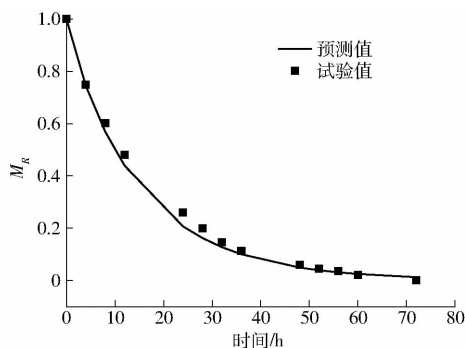


图 5 Page 模型的验证

Fig. 5 Validation of Page model

范围在  $3.00124 \times 10^{-10} \sim 1.14753 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$  之间, 并且其决定系数  $R^2$  在 0.88511 ~ 0.97444 之间变化, 说明线性回归得到的结果较好。当干燥风速及装载量条件固定时, 风干板栗有效水分扩散系数随着干燥温度及风速的提高而增大, 当干燥风速 2.0 m/s、装载量 3.0 kg 时, 风干板栗在 35℃ 干燥时的有效水分扩散系数约是 15℃ 干燥时有效水分扩散系数的 2.5 倍; 当干燥温度及干燥风速条件固定时, 风干板栗有效水分扩散系数与装载量呈负相关, 装载量越低, 板栗有效水分扩散系数越大。

表 4 太阳能-热泵联合干燥风干板栗有效水分扩散系数统计结果

Tab.4 Statistical results of effective moisture diffusion coefficient of air-dried chestnut drying by solar energy and heat pump

试验序号	温度/℃	风速/(m·s <sup>-1</sup> )	装载量/kg	决定系数 R <sup>2</sup>	k <sub>0</sub>	有效水分扩散系数/(m <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> )
1	15	2.0	3.0	0.92297	-1.31649 × 10 <sup>-5</sup>	3.00124 × 10 <sup>-10</sup>
2	20	2.0	3.0	0.92674	-1.81532 × 10 <sup>-5</sup>	4.13844 × 10 <sup>-10</sup>
3	25	2.0	3.0	0.88511	-2.58226 × 10 <sup>-5</sup>	5.88685 × 10 <sup>-10</sup>
4	30	2.0	3.0	0.90883	-3.15082 × 10 <sup>-5</sup>	7.18301 × 10 <sup>-10</sup>
5	35	2.0	3.0	0.94158	-3.69393 × 10 <sup>-5</sup>	8.42115 × 10 <sup>-10</sup>
6	25	1.0	3.0	0.91427	-1.99461 × 10 <sup>-5</sup>	4.54717 × 10 <sup>-10</sup>
7	25	3.0	3.0	0.95122	-2.95125 × 10 <sup>-5</sup>	6.72805 × 10 <sup>-10</sup>
8	25	4.0	3.0	0.95485	-3.53985 × 10 <sup>-5</sup>	8.06989 × 10 <sup>-10</sup>
9	25	5.0	3.0	0.95346	-4.00823 × 10 <sup>-5</sup>	9.13767 × 10 <sup>-10</sup>
10	25	2.0	0.6	0.94043	-5.03363 × 10 <sup>-5</sup>	1.14753 × 10 <sup>-9</sup>
11	25	2.0	1.8	0.97444	-2.69497 × 10 <sup>-5</sup>	6.14380 × 10 <sup>-10</sup>
12	25	2.0	4.2	0.91769	-1.87500 × 10 <sup>-5</sup>	4.27449 × 10 <sup>-10</sup>
13	25	2.0	5.4	0.95698	-1.40562 × 10 <sup>-5</sup>	3.20443 × 10 <sup>-10</sup>

## 3 结论

(1) 在不同干燥温度、干燥风速及装载量下, 风干板栗的太阳能-热泵联合干燥曲线呈现基本相同的变化趋势。干燥温度、干燥风速及装载量对风干板栗干燥速率均有影响, 干燥初始阶段有短暂的调整阶段, 整个过程主要表现为降速干燥。

(2) 在干燥数学模型实验中, 通过比较 6 种不同数学模型残差平方和、卡方 ( $\chi^2$ ) 及决定系数 ( $R^2$ ), 发现

Page 模型是描述风干板栗干燥过程中水分变化的最优拟合模型, 对数据进行回归分析得到 Page 模型数学表达式, 根据表达式验证发现, Page 模型的预测值与试验值吻合较好。表明 Page 模型能较好地描述风干板栗太阳能-热泵联合干燥过程中水分变化规律。

(3) Fick 第二扩散定律计算风干板栗有效水分扩散系数为  $3.00124 \times 10^{-10} \sim 1.14753 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$  之间, 其随着干燥温度及干燥风速的升高、装载量的降低而增大。

## 参 考 文 献

- [1] 林顺顺,祝美云,张建威. 中国板栗的研发现状和前景[J]. 农产品加工(学刊), 2010(12): 74-76.  
LIN Shunshun, ZHU Meiyun, ZHANG Jianwei. Research status and prospects of Chinese chestnut[J]. The Processing of Agricultural Products, 2010(12): 74-76. (in Chinese)
- [2] QIAN Li, SHI Xianhe, ZHAO Qiaojiao, et al. Effect of cooking methods on nutritional quality and volatile compounds of Chinese chestnut (*Castanea mollissima* Blume)[J]. Food Chemistry, 2016, 201(15): 80-86.
- [3] 蔡荣, 魏佳花, 祁春节. 板栗产业发展现状、问题与对策[J]. 北方果树, 2007(4): 1-3.
- [4] BLAIOTTA G, DI CAPUA M, COPPOLA R, et al. Production of fermented chestnut purees by lactic acid bacteria[J]. Pubmed, 2012, 158(3): 195-202.
- [5] 黄礼平. 板栗常温保鲜贮藏的难点与对策[J]. 陕西林业科技, 2012(4): 120-122.  
HUANG Liping. Storage of chestnut at the normal temperature difficulties and countermeasures [J]. Shanxi Forest Science and Technology, 2012(4): 120-122. (in Chinese)
- [6] LINGAYAT A B, CHANDRAMOHAN V P, RAJU V R K, et al. A review on indirect type solar dryers for agricultural crops dryer setup, its performance, energy storage and important highlights[J]. Applied Energy, 2020, 258: 114005.
- [7] 王海, 高月, 王颖, 等. 适宜干燥方法提高干燥制枸杞品质[J]. 农业工程学报, 2015, 31(21): 271-276.  
WANG Hai, GAO Yue, WANG Jie, et al. Optimal drying method improving quality of *Lycium barbarum* L[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(21): 271-276. (in Chinese)
- [8] 班婷, 朱明, 王海. 太阳能集热器的研制及结构优化[J]. 农业工程学报, 2011, 27(增刊): 277-281.  
BAN Ting, ZHU Ming, WANG Hai. Design and structural optimization of flat-plate solar air collector[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(Supp.): 277-281. (in Chinese)
- [9] VIJAYAVENKATARAMAN S, INIYAN S, GOIC R. A review of solar drying technologies[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, 16(5): 2652-2670.
- [10] PIRASTEHEH G, SAIDUR R, RAHMAN S. M. A, et al. A review on development of solar drying applications[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 31: 133-148.
- [11] KAPSALIS V, KARAMANIS D. Solar thermal energy storage and heat pumps with phase change materials [J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 99: 1212-1224.
- [12] SEYFI S. Experimental investigation of a new design solar-heat pump dryer under the different climatic conditions and drying behavior of selected products[J]. Solar Energy, 2014, 105: 190-205.
- [13] 刘一健. 利用混联式太阳能果蔬干燥设备干燥无核白葡萄、枣和杏的工艺研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2009.  
LIU Yijian. Study on drying technology of thomson seedless, jujube and apricot with the equipment of drying fruits and vegetables by series parallel solar energy[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2009. (in Chinese)
- [14] 张良清. 太阳能-热泵联合干燥系统干制龙眼肉的技术研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2015.  
ZHANG Liangqing. Studies on the drying technology of longyan pulps by solar assisted heat pump drying system[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2015. (in Chinese)
- [15] 代亚萍, 邓凯波, 郑宝东. 南瓜片太阳能-热泵联合干燥特性及动力学模型[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2019, 48(2): 259-265.  
DAI Yaping, DENG Kaibo, ZHENG Baodong. Drying characteristics and dynamic analysis of pumpkin slices using solar-assisted heat pump drying[J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition) 2019, 48(2): 259-265. (in Chinese)
- [16] BAHER M. A. A, GOTTSCHALK K, HOSSAIN M A. Integrated hybrid solar drying system and its drying kinetics of chamomile[J]. Renewable Energy, 2018, 121: 539-547.
- [17] 陈振林, 郭婷, 赵广河, 等. 红瓜子薄层热风干燥特性及其动力学研究[J]. 食品与机械, 2014, 30(6): 23-26.  
CHEN Zhenlin, GUO Ting, ZHAO Guanghe, et al. Hot air drying characteristics and drying kinetics mathematical model for red melon seed[J]. Food and Machinery, 2014, 30(6): 23-26. (in Chinese)
- [18] 楚文靖, 盛丹梅, 张楠, 等. 红心火龙果热风干燥动力学模型及品质变化[J]. 食品科学, 2019, 40(17): 150-155.  
CHU Wenjing, SHENG Danmei, ZHANG Nan, et al. Hot-air drying of red-fleshed pitaya: kinetic modelling and quality changes[J]. Food Science, 2019, 40(17): 150-155. (in Chinese)
- [19] 马锦, 牟韶雷, 朱德泉, 等. 山核桃微波干燥动力学模型研究[J]. 食品工业科技, 2015, 36(5): 108-112.  
MA Jin, MU Shaolei, ZHU Dequan, et al. Study on the microwave drying characteristics and dynamic model of kernel of hickory (*Carya cathayensis* Sary) [J]. Science and Technology of Food Industry, 2015, 36(5): 108-112. (in Chinese)
- [20] 张乐, 赵守焕, 王赵改, 等. 板栗微波真空干燥特性及干燥工艺研究[J]. 食品与机械, 2018, 34(4): 206-210.  
ZHANG Le, ZHAO Shouhuan, WANG Zhaogai, et al. Microwave vacuum drying characteristics and drying process of Chinese chestnut[J]. Food and Machinery, 2018, 34(4): 206-210. (in Chinese)
- [21] 张乐, 李鹏, 王赵改, 等. 板栗片微波真空干燥的动力学模型及品质分析[J]. 现代食品科技, 2020, 36(4): 235-243.  
ZHANG Le, LI Peng, WANG Zhaogai, et al. Microwave-vacuum drying kinetics model and quality analysis of Chinese chestnut slice[J]. Modern Food Science and Technology, 2020, 36(4): 235-243. (in Chinese)
- [22] TERESA D, JOSE A P, SUSANA C. Effect of drying on color, proximate composition and drying kinetics of sliced chestnut[J]. Journal of Food Process Engineering, 2016, 39(5): 512-520.
- [23] RAQUEL P F G, FERNANDES R M C. Analysis of the drying kinetics of chestnuts[J]. Journal of Food Engineering, 2006, 76(3): 460-467.
- [24] MOREIRA R, CHENLO F, CHAGURI L, et al. Mathematical modelling of the drying kinetics of chestnut (*Castanea sativa* Mill.) [J]. Food and Bioprocess Processing, 2005, 83(4): 306-314.
- [25] SIMAL S, DEYÁ E, FRAU M, et al. Simple modelling of air drying curves of fresh and osmotically predehydrated apple cubes [J]. Journal of Food Engineering, 1997, 33(1-2): 139-150.
- [26] SAFA M, OUHAMMOU M, HIDAR N, et al. Drying characteristics and kinetics solar drying of Moroccan rosemary leaves [J]. Renewable Energy, 2017, 108: 303-310.
- [27] 丁昌江, 杨茂生. 直流高压电场中枸杞的干燥特性与数学模型研究[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(6): 302-311.  
DING Changjiang, YANG Maosheng. Drying characteristics and mathematical models of chine wolfberry in DC high voltage electric field[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(6): 302-311. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20170640&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170640&flag=1). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.06.040. (in Chinese)
- [28] CRANK J. The mathematics of diffusion [M]. Oxford, England: Clarendon Press, 1975.
- [29] 关志强, 王秀芝, 李敏, 等. 荔枝果肉热风干燥薄层模型[J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(2): 151-158.  
GUAN Zhiqiang, WANG Xiuzhi, LI Min, et al. Mathematical modeling of hot-air of thin layer litchi flesh[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(2): 151-158. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20120230&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20120230&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2012.02.030. (in Chinese)
- [30] 刁卓超, 杨薇, 李建欢, 等. 澳洲坚果热风干燥特性研究[J]. 食品与机械, 2010, 26(6): 44-46.  
DIAO Zhuochao, YANG Wei, LI Jianhuan, et al. Study on characteristics of macadamia nut by hot air drying in different temperature[J]. Food and Machinery, 2010, 26(6): 44-46. (in Chinese)